

大型空分装置用轴流 + 离心空压机优化研究

杜崇洋 刘晓鹏 张国鑫

(沈阳鼓风机集团股份有限公司 辽宁 沈阳 110000)

摘要: 应用于10万等级大型空分装置的轴流+离心空压机结构复杂、加工难度大,一直被国外企业所垄断。在国内自主研发领域,目前仅有沈阳鼓风机集团股份有限公司(以下简称“沈鼓”)为神华宁煤、宁夏鲲鹏设计制造的5台轴流+离心空压机。大型空分装置用轴流+离心压缩机研制是围绕国家重大装备技术需求,结合沈鼓以往压缩机设计、制造及试验过程中的经验及问题,在气动、结构和材料等方面进行优化和研究。沈鼓开发出的高可靠性、高效率大型轴流+离心空压机在超大型空分压缩机领域技术先进,达到国际领先水平。

关键词: 空分装置;轴流+离心;轴向进气

1 煤化工产业中的空分装置背景

我国是一个“缺油、少气、富煤”的国家,其能源资源特点决定了煤炭在一次能源中的重要地位。随着我国石油和天然气对外贸易依存度的不断提高,能源安全问题日益凸显,发挥煤炭资源优势,进行煤炭清洁开发和利用成为我国石油和天然气替代战略的必然选择。通过煤的气化、液化和焦化工工艺可实现煤制甲醇、煤制天然气、煤制化肥和煤制烯烃等的制备。煤炭能源化工产业在我国能源的可持续利用中扮演着重要的角色,是今后20年的重要发展方向,这对于减轻我国燃煤造成的环境污染、降低我国对进口石油的依赖均有着重大的战略意义。国家“十三五”规划中明确提出,要有序发展煤炭深加工,稳妥推进煤制燃料、煤制烯烃等升级示范,增强项目竞争力和抗风险能力。

作为煤化工产业中的核心装备,超大流量轴流、离心共轴空分装置用压缩机组的开发、设计、制造是目前通用机械领域的难题。产能达到10万等级的空分压缩机目前只有德国曼透平和西门子公司掌握。其中曼透平机组结构为:6级轴流+1级离心压缩机,机型为AR型;西门子机组结构为:10级轴流+2级离心压缩机,机型为SR型。两家公司均采用轴向进气模式。

在此背景下,我国要想推进煤炭能源的转型升级、实现“十三五”规划的能源调整目标,大型空分装置用空压机的国产化迫在眉睫,势在必行。

2 轴流+离心空压机概述

轴流+离心大型空分装置用空压机研制围绕国家重大装备技术需求,在神华宁煤10万空分项目中,沈鼓设计生产了国内首台径向进气的MAC180轴流+离心空

压机(8级轴流+2级离心);在宁夏宝丰10.5万空分项目中,进一步开展专项技术攻关,开发了新一代轴向进气的MAC180轴流+离心空压机(8级轴流+2级离心);在宁夏宝丰10.5万空分2期项目中,再次创新,开发出轴向进气的SACC180轴流+离心空压机(6级轴流+1级离心)。图1所示为国内首台10万等级轴流+离心空压机组。

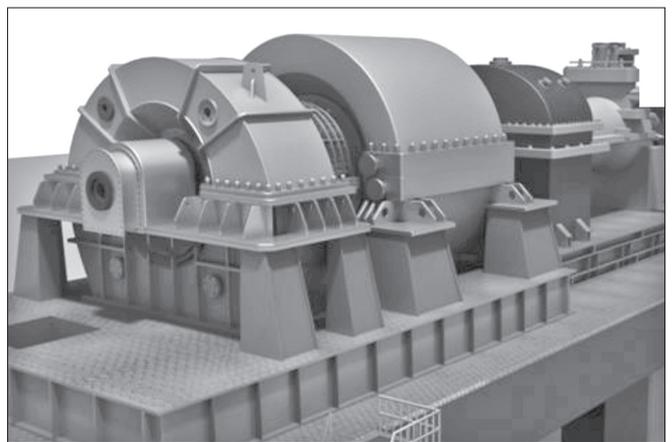


图1 国内首台10万等级轴流+离心空压机组

沈鼓设计制造的轴流+离心空压机组经历了三代技术升级,在安全稳定、运营成本和安装维护等方面均达到国际领先水平。其技术特点主要表现为:转子由8级轴流+2级离心改进为6级轴流+1级离心,使机组运转安全可靠提高、转子振动减小、转子重量减轻便于安装维护;机壳由轴流、离心两段分体机壳改为整体机壳,提高机壳刚性;径向进气结构改为轴向进气结构,减小进气蜗室损失;优化叶轮结构,提高叶轮效率,降低运营成本;优化汽轮机、冷却器、油系统、管路管件阀门等附属设备技术指标,减少对机组能耗指标的

影响；进气机壳及轴承区标准化、模块化设计，便于安装维护；提升机组外观质量，优化布置仪表管线、机旁管路等；降低机组制造成本，提高国际市场竞争力。

3 轴流 + 离心空压机通流方案介绍

轴流 + 离心空压机性能参数要求如下：

入口流量：550000Nm³/h；入口压力：0.87barA；入口温度：29℃；相对湿度：60%；出口压力：5.7barA；转速：3350r/min；压缩机轴功率：43714kW。

轴流形式适合大流量、效率高、压比小；离心形式适合高压比、效率较高、流量相对小。根据这些特征，压缩机采用轴流 + 离心共轴结构，完全满足了空分压缩机大型化的需求。

压缩机通流方案设计是行业内公认的难点课题和核心内容，是保证机组高效、可靠等方面指标的必要环节。轴流 + 离心空压机通流方案研究包括：全静叶可调高效轴流压缩段设计，满足多种运行工况并获得很宽的流量调节范围；大轮毂比、大流量系数、高效离心压缩段设计，进气室采用导流叶片大幅降低气体流动损失；轴流段与离心段总成优化设计，调整轴流和离心段的最优级数、各级直径、同轴转速、各级特征参数（流量系数、能量头系数）等，使整机最高效率达到90%；根据项目通流方案需求，开发模型级并完成大功率、大尺寸、高马赫数模型级试验台建设用于测试模型级性能。

4 轴流 + 离心空压机结构介绍

4.1 转子结构

首台轴流 + 离心空压机转子采用轴流段8级 + 离心段2级结构，见图2。转子重量大，为减轻转子重量，主轴采用三段把合形式，中间段（轴流段）为空心轴结构，左右两段局部也设计为空心结构以减轻重量。主轴把合螺栓设计难度高、加工困难大，需进行大量力学分析，考虑材料性能、结构尺寸、加工工艺和装配工艺等多方面因素，沈鼓具有其全部的自主知识产权。新一代轴流 + 离心空压机转子改进为轴流段6级 + 离心段1级结构，转子重量大幅降低，使主轴可采用整体锻造形式，从而增加了转子刚性，提高

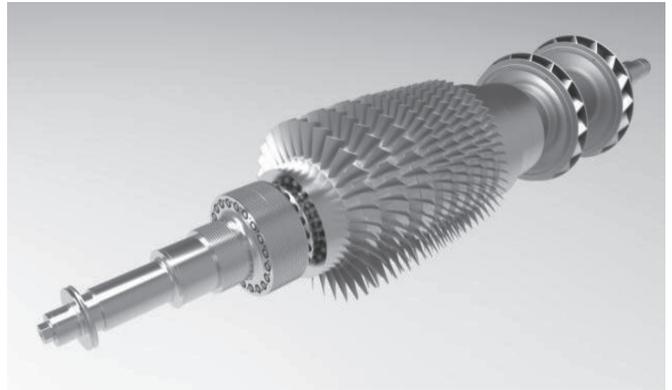


图2 轴流段8级 + 离心段2级结构

了转子运行稳定性，便于安装维护，降低了成本，提高了与国外企业对标时的市场竞争力。

轴流叶片采用整体铣制，嵌入主轴中的燕尾槽中；离心段的叶轮采用铣制 + 焊接形式，叶轮与主轴采用过盈配合，为方便动平衡，在轮盘背部设置可调整位置的平衡块。轴流叶片和离心叶轮进行了复杂且全面的力学分析：满足驱动机跳闸转速下的强度要求的应力分析；轴流动静叶片之间的频率干涉分析；离心叶轮叶片与进气室静叶片之间的频率干涉分析。转子通过横向振动及稳定性分析保证转子能安全稳定运行，且过程中的振动值满足API617要求。

4.2 定子结构

首台轴流 + 离心空压机采用轴流、离心两段分体机壳，径向进气结构。新一代轴流 + 离心空压机改进为轴流、离心段整体机壳。轴流 + 离心空压机结构见图3。整体机壳在其内部为轴流段的静叶栅、中央内机壳

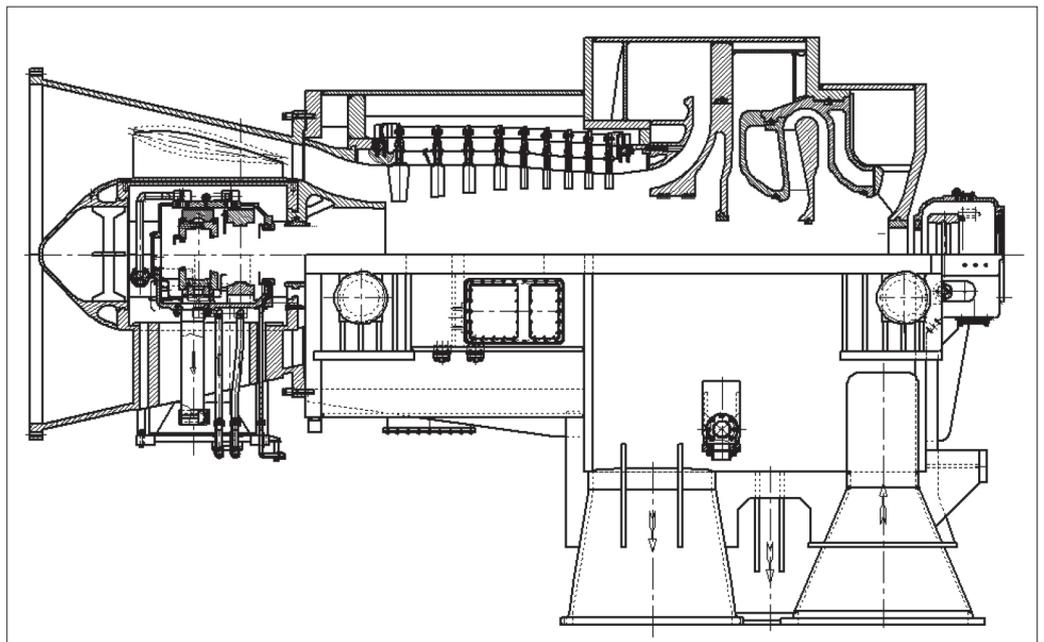


图3 轴流 + 离心空压机定子

设置了安装支座,方便轴流段内机壳的安装、找正及检修。锚爪支撑座采用加强筋固定的吊柱,满足下机壳的整体吊装。轴流段机壳两侧设置了独立的执行器(用于静叶调节)安装支架、可拆装人孔用于执行器的安装检修和机组正常运转时观察。轴流段底部设置了可拆装人孔,一是方便机组检修,二是兼顾轴流段的通风,避免内、外机壳腔内集聚高温气体。轴流、离心段整体机壳与以往的分段式机壳相比,刚性更好,压缩机检/维修更为便利。

空分装置的大型化导致了压缩机组的大型化,那么随之而来的是压缩机的机壳、隔板体积和尺寸巨大,其刚性和强度在工作状态的特性很复杂。精确分析是消除大型结构件安全隐患的重要手段。轴流+离心空压机在设计过程中,整体机壳和隔板进行了强度、刚性分析,指导设计改善,保证安全。针对大型隔板进行强度、变形分析,保证隔板在工作状态不会因温度和压差的原因出现较大变形和强度不足。针对整体机壳进行强度、变形分析,保证其在水压试验时不会产生巨大变形,导致结构件脱焊或撕裂,甚至泄漏。

轴向进气机壳采用水平剖分结构,通过垂直向的法兰与整体机壳把合在一起,并以止口定位。进气机壳内部设置有翼型板导流,以减少气流通过时的流动损失并起到支撑作用。支撑、推力轴承箱设置在进气机壳的内部,分内外两层结构,内轴承箱外部设置轴承箱外壳组,轴承箱外壳组前后端分别与前导流罩和后导流罩止口连接,轴承箱外壳组固定于进气机壳上。进气机壳的下半机壳设置支撑筋板以提高刚性。

4.3 橇块设计

新一代轴流+离心空压机将轴承温度、轴振动、轴位移的检测仪表及接线从轴承箱盖连接到接线箱,全部集成在本体上。为了布局美观、走线简洁,在机壳两侧分别布置温度检测和振动位移检测两个接线箱,在三维模型中建立空间点连接引线,使引线紧贴机壳布置,仪表箱通过定制的支架安装在机壳两侧。

顶升油系统是轴流+离心空压机的标准配置,主要由高压油泵、电机、过滤器、调节阀、压力表、安全阀和管路等部件组成。为实现本体的高度集成化,将顶升油及其附属件全部安装在机壳周围,提高了外观质量和操作便利性。

导叶调节机构及液压执行器均安装在整体机壳内,液压油系统通过机壳上的管路接头与伺服油站连接。

5 轴流+离心空压机检验与试验

煤化工流程的空分压缩机通常采用汽轮机驱动,为确保10万等级空分装置用压缩机机械运转及气动性能指标均达到西门子、曼透平等国际领先水平,需在机

组出厂前进行汽轮机驱动条件下的全速全压性能试验。沈鼓的压缩机试验台最大能力为:满足驱动机30MW机组的性能试验,对应空分规模为6万空分等级。为完成10万等级空分装置用压缩机的性能试验,沈鼓研制了国内首套100MW级汽轮机驱动试验装置及蒸汽系统,对新建的压缩机试验台制定了明确的指标要求:在国家能源大型压缩机组研发(实验)中心,建设煤化工配套大型空分压缩机组试验装置。该试验装置由沈鼓自行设计、制造,可完成大型压缩机组试车,具备完善的测试系统,可满足最大15万等级空分压缩机组的机械运转及全负荷性能试验要求,同时可以进行超大型压缩机组的开发、研究工作。100MW级空分压缩机试验装置主要包括试车台、试车设备、在线监测及控制系统、锅炉蒸汽供给、循环水系统、氮气、仪表风和其他辅助系统等。

6 结语

中国机械工业联合会与中国通用机械工业协会联合主持了“首台套神华宁煤10万等级空分装置用压缩机”工业运行评审会。会上,专家们主要听取了沈鼓、神华宁煤的机组研制及运行情况汇报并进行现场评审。最终评审意见认为,国产10万等级空分装置用压缩机可以满足国内10万等级空分装置的大型煤化工工程,填补了国内空白,打破了国外对特大型空分装置用压缩机的垄断,是我国重大装备国产化的又一次突破,其主要技术性能达到国外同类装置和产品的先进水平,标志着我国国产化大型空分设备正式进入10万等级时代,建议尽快推广使用。

10万等级空分装置用压缩机是国之重器,沈鼓应用先进的设计方法和制造工艺将其研制成功,成为世界上第三个能够设计制造该大型核心设备的企业。沈鼓生产的10万等级空分装置用压缩机结构设计和材料选择合理,可长期安全可靠运行,此规格机组的国产化示范应用和产业化推广,将在打破国外技术和市场垄断、扩大国产市场份额、带动风机行业进步和推动煤炭深加工产业发展等方面产生巨大的经济效益。

参考文献:

- [1] 黄钟岳,王晓放.透平式压缩机[M].北京:化学工业出版社,2004.
- [2] 徐忠.离心式压缩机原理(修订本)(第二版)[M].北京:机械工业出版社,1990.

作者简介:杜崇洋(1983-),男,汉族,辽宁丹东人,本科,高级工程师,研究方向:空分及煤化工行业压缩机的设计。